心理学报 2022, Vol. 54, No. 7, 779−788
Acta Psychologica Sinica

https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2022.00779

内隐序列学习表征机制探究：眼动证据*

卢张龙 刘梦娜 刘玉洁 马盼盼 张瑞平

(郑州大学教育学院, 郑州 450001)

摘 要 内隐序列学习的表征机制是内隐学习研究领域的基本问题, 还存在争议。采用眼动追踪技术, 通过3个实验探讨内隐序列学习的表征机制。结果发现, 知觉序列混合眼跳和反应序列混合眼跳条件下发生序列学习; 朝向眼跳和反向眼跳条件下发生序列学习; 有、无分心反向眼跳下发生序列学习, 两者序列学习量差异不显著。整个研究表明, 内隐序列学习的表征依赖于序列信息。

关键词 序列学习, 表征, 反向眼跳, 混合眼跳, 眼动

分类号 B842

1 引言

内隐序列学习源于人们对自然语言现象研究, 如今序列学习受到越来越多研究者的关注(郭秀艳, 2003; Cleeremans et al., 2019)。序列学习研究大多采用Nissen和Bullemer (1987)创建的序列反应时任务, 要求被试对刺激所在位置进行反应, 刺激出现的位置遵循序列规则, 但被试不知道规则的存在。该任务典型结果是：在学习阶段, 规则序列的反应时下降速度大于随机序列; 当从规则序列过渡到随机序列时, 反应时有所增加(郭秀艳, 2003; 郭秀艳 等, 2008)。意识性测验一般采用Jacoby (1991)的加工分离程序(Process Dissociation Procedure, PDP), 包括包含任务(inclusion test)和排除任务(exclusion test)。包含任务要求被试用先前学过的知识完成任务, 也可以用其他信息, 即可以利用有意识提取和无意识熟悉性两种加工完成任务; 排除任务要求被试不能用先前学过的知识完成任务, 如果被试错误地选择了学过的知识, 这些知识就是无意识知识。通过加工分离程序可以分离出序列学习的内隐知识和外显知识(关守义, 郭秀艳, 2016; 张剑心 等, 2016)。

序列学习的表征方式是内隐学习领域的研究热点和难点之一, 序列学习表征方式的难点在于如何将不同类型序列进行分离, 为此学者们采取了不同改进方法。第一种改进方法是采用序列学习的观察范式, 即让被试观察序列而不需要作出按键反应(Howard et al., 2008); 第二种改进方法是刺激遵循序列规则, 存在知觉序列。但反应随机变化, 不存在反应序列, 刺激和反应不是一一对应关系(Deroost & Coomans, 2018; Deroost et al., 2012; Taesler et al., 2019); 第三种改进方法是知觉序列保持不变, 反应序列发生改变(Németh et al., 2009); 第四种改进方法是刺激某一维度存在知觉序列(例如颜色序列), 但不需要对刺激的颜色做出反应, 而对刺激的另一维度(例如形状)做出反应(Coomans et al., 2012)。内隐序列学习的表征方式, 目前还没有统一结论(Cleeremans et al., 2019), 主要有以下几种观点：知觉表征观点认为人们在序列反应时任务中习得的是相邻刺激和刺激之间的联结, 是对刺激序列规则的学习, 依赖前后刺激联结的学习(Stimulus-Stimulus associations, Haider et al., 2014); 反应表征观点认为人们在序列反应时任务中习得的是相邻反应和反应之间的联结(Response-Response associations, Haider et al., 2013); 知觉−反应联结表征观点认为在序列反应时任务中习得了刺激−反应联结(反应选择) (Stimulus-Response associations,

收稿日期: 2021-08-06
* 中宣部宣传思想文化青年英才项目; 河南省教育厅人文社会科学研究项目(2020-ZDJH-419)。
通信作者: 卢张龙, E-mail: psylzl@zzu.edu.cn; 张瑞平, E-mail: flyrui@126.com

Schwarb & Schumacher, 2010)。

内隐序列学习的表征方式存在争议，与按键反应本身存在缺陷有关。按键反应是个复杂的认知加工过程，将不同类型序列学习混淆在一起。在完成按键反应过程中，手指的运动是一类事件；反应键被摁是另一类事件，这是手指运动的一个结果；还有可作为动作反馈或效果的事件，称为效果事件(例如在按键上受到压力)。传统的序列学习按键反应，包含了效应器序列(手指运动序列)、反应空间位置序列(反应按键序列)和反应效果序列(Haider et al., 2014; Jablonowski et al., 2018)。被试对序列的学习，可能是基于手指运动的序列发生序列学习；也可能是基于反应键依次被按的序列发生序列学习，也可能是将反应所得到的效果依次联结起来发生序列学习。而且将按键反应进行随机化处理(Deroost & Coomans, 2018; Deroost et al., 2012; Taesler et al., 2019)，被试每次反应前都需要重新寻找当前刺激对应的按键，增大了被试反应时的离散程度。按键反应的随机化对序列学习产生干扰，降低了序列学习效应(Taesler et al., 2019)。

为了解决按键反应存在的问题，一个行之有效的方法是将眼动作为反应(卢张龙，2021；Coomans et al., 2012; Goschke & Bolte, 2012)，不需要被试做出按键反应。Kinder 等人(2008)首次将眼动记录法应用于序列学习。在屏幕呈现 4 个位置，目标刺激出现在其中一个位置，被试眼睛移动到目标刺激所在位置，使用眼动仪记录眼动，不需要做出按键反应。和经典序列学习反应时结果相似(郭秀艳 等，2008；卢张龙 等, 2011)：在学习阶段，随着学习次数的增加，眼跳反应时逐渐下降；在迁移阶段，呈现随机序列后，眼跳反应时突然增加，眼动指标和经典的反应时指标具有共变性(covary)。目前序列学习的眼动指标主要有：眼跳反应时、预期眼跳率、预期指数和眨眼频率。Marcus 等人(2006)和 Vakil 等人(2017)对按键反应和眼动反应进行了比较。Marcus 等人(2006)发现无论眼动反应还是按键反应，刺激出现前，被试将注意转移到刺激将要出现的位置，表现出预期眼跳。Vakil 等人(2017)发现眼动反应和按键反应的区别主要在于：随机组段是否回到基线水平。随机组段下眼跳反应时和预期眼跳率回到基线水平，但按键反应的反应时成绩都好于基线水平。这可能是由于按键反应条件下序列学习包含了其他认知加工。Vakil 等人(2017)认为，眼动指标比按键反应时更纯净。

为了分离知觉序列、反应序列和知觉−反应联结序列，本研究将反向眼跳任务和朝向眼跳任务引入到序列反应时任务中。反向眼跳(antisaccade)由 Hallett (1978)首次提出，在镜像反向眼跳任务中，要求被试眼睛跳向与目标出现位置相反并且以注视点为中心的镜像位置；朝向眼跳(prosaccade)要求被试眼睛跳向视觉刺激出现的位置(闫国利，白学军, 2018)。朝向眼跳任务中知觉刺激和反应是同一位置，反向眼跳任务中知觉刺激和反应是镜像关系。将朝向眼跳任务和反向眼跳任务混合后，知觉和反应不存在一一对应关系。本研究首次将朝向眼跳任务、反向眼跳任务和序列反应时任务相结合，通过 3 个眼动实验，考察序列学习是否存在知觉表征、反应表征和知觉−反应联结表征。实验 1 目的是考察存在知觉序列或反应序列时，是否发生序列学习；实验 2 目的是考察存在知觉−反应联结序列时，是否发生序列学习。为了排除知觉序列、反应序列对实验 2 结果的影响，实验 3 在实验 2 基础上，进一步通过增加分心刺激，排除知觉序列、反应序列对结果的影响(Schumacher & Schwarb, 2009)，考察存在知觉−反应联结序列时，是否发生序列学习。

实验 1 考察序列学习是否存在知觉表征和反应表征，为此实验 1 将朝向眼跳任务和反向眼跳任务进行混合，被试根据刺激颜色做出朝向眼跳或反向眼跳。知觉和反应不存在对应关系，知觉序列混合眼跳条件下刺激位置遵循序列规则，不存在反应序列；反应序列混合眼跳条件下反应遵循序列规则，刺激位置不遵循序列规则。通过混合眼跳实现知觉序列和反应序列的分离。由此实验 1 假设：知觉序列混合眼跳条件下存在知觉序列，发生序列学习；反应序列混合眼跳条件下存在反应序列，发生序列学习。实验 2 考察序列学习是否存在知觉−反应联结表征。实验 2 朝向眼跳和反向眼跳任务单独呈现，不再进行混合。在朝向眼跳或反向眼跳任务中，存在知觉−反应联结，朝向眼跳任务中刺激和反应是一致关系，反向眼跳任务中刺激和反应是镜像关系。由此实验 2 假设：朝向眼跳条件下和反向眼跳条件下存在知觉−反应联结序列，发生序列学习。为了排除知觉序列、反应序列可能对实验 2 结果的影响，实验 3 增加了分心刺激，分心刺激和目标刺激共享一个特征，例如相同颜色或相同形状。由于反应选择是知觉−反应联结的核心机制，分心刺激对反应选择没有影响，对知觉序列、反应序列产生干扰(Schumacher & Schwarb, 2009)。由此实验 3 假

设：有、无分心刺激条件下都存在知觉−反应联结序列，发生序列学习。

2　实验 1：混合眼跳条件下的序列学习

2.1　被试

在校大学生 40 人，其中男性 23 名，女性 17 名，平均年龄为 20.72 ± 1.52 岁。视力或矫正视力正常，身体健康，均为右利手且母语为中文，之前均未参加过类似内隐学习实验。被试在完成实验后得到一份小礼物。

2.2　实验设计

采用单因素被试间实验设计，自变量为混合眼跳，有两个水平：知觉序列混合眼跳和反应序列混合眼跳，因变量为眼跳反应时。当目标刺激为红色圆点时，进行朝向眼跳；当目标刺激为绿色圆点时，进行反向眼跳。知觉序列混合眼跳指刺激出现的位置遵循序列规则；反应序列混合眼跳指眼跳的位置遵循序列规则。被试随机分配到知觉序列混合眼跳组或反应序列混合眼跳组。

2.3　实验材料

在屏幕中央从左至右水平排列四个黑色方框，背景为白色，红色圆点或绿色圆点出现在其中一个方框。在规则组段中，红色圆点或绿色圆点按序列规则出现；在随机组段中，红色圆点或绿色圆点随机出现在其中一个方框中。

2.4　实验仪器

采用 EyeLink 1000 plus 眼动仪，采样率为 1000 Hz。显示器分辨率为 1024×768 像素，刷新频率为 75 Hz。被试眼睛与屏幕的距离为 60 cm。被试双眼注视屏幕，但只记录右眼的眼动轨迹。实验程序采用 Experiment Builder 1.1 进行编制。

2.5　实验程序

实验包括序列反应时任务和意识性水平测试两部分，序列反应时任务流程图如图 1 所示。

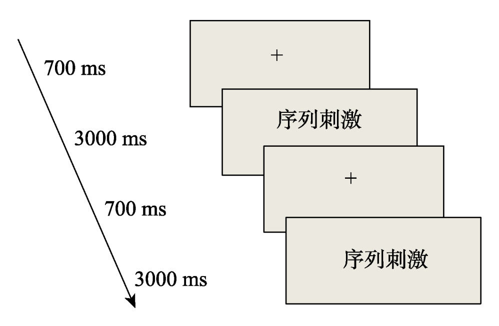


图 1　序列反应时任务流程图

2.5.1　序列反应时任务

实验开始时对眼动仪进行五点校准，校准成功后，在屏幕中央出现注视点“+”，要求被试盯住“+”，进入练习阶段。练习阶段共包含 50 个试次，刺激随机呈现。当红色圆点出现时，要求被试眼睛注视红色圆点所在位置，电脑自动翻屏；当绿色圆点出现时，要求被试眼睛注视绿色圆点所在位置的镜像位置，电脑自动翻屏。练习结束后，进入正式实验。正式实验共 13 个组段，每个组段包括 96 个试次。其中第 12 个组段为随机组段，其他 12 个组段为序列规则组段，序列规则为 4-1-3-2-1-2-4-3-1-4-2-3，1、2、3、4 分别对应着电脑屏幕从左至右排列的四个黑色方框位置。每一个序列规则组段的起始位置随机出现。组段中间休息 2 分钟。

2.5.3　意识性水平测试

完成序列反应时任务后，按照加工分离程序(Jacoby, 1991)对被试进行意识性水平测试，包括排除任务和包含任务。包含任务中，向被试呈现随机两个相邻出现红色圆点的方框，让被试按照序列规则填写下一次红色圆点可能出现的位置，每填对 1 个记 1 分；在排除任务中，仍给出序列规则中的两个相邻位置，但是要求被试填写下一次红色圆点不会出现的位置，且要求不能与前面出现的两个位置相同。如果被试按照序列规则填写，每填出 1 个记 1 分。包含任务和排除任务总分各为 12 分。

2.6　结果与分析

采用眼动数据分析软件“Data Viewer 1.1”和 SPSS 21.0 进行数据分析，3 人由于校准问题，未完成实验，数据被剔除。删除 3 个标准差以外极端数据(0.27%)。

2.6.1　意识性水平测试

根据被试在意识性水平测试的成绩，包含条件的得分小于 3 分，或者包含条件得分小于或等于排除条件得分的被试为内隐被试，不满足以上条件的被试为外显被试(吕勇 等, 2008; Lu & Li, 2018)，7 名外显被试数据被剔除。知觉序列混合眼跳组和反应序列混合眼跳组分别 15 人。

2.6.2　眼跳反应时

知觉序列混合眼跳和反应序列混合眼跳条件下的眼跳反应时如图 2 所示。对 1~11 组段眼跳反应时进行 2 (组别：知觉序列混合眼跳组、反应序列混合眼跳组) × 11 (组段：1~11)方差分析，结果发现：组段主效应显著，$F(10, 280) = 207.36$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.88$，随着组段增加，眼跳反应时逐渐减小。组

别主效应不显著，知觉序列混合眼跳组的眼跳反应时(M = 1066.18 ms, SD = 41.00)和反应序列混合眼跳组的眼跳反应时差异不显著(M = 1056.95 ms, SD = 85.43), $F(1, 28) = 0.14$, $p = 0.71$。组段和组别交互作用不显著, $F(10, 280) = 0.42$, $p = 0.94$。

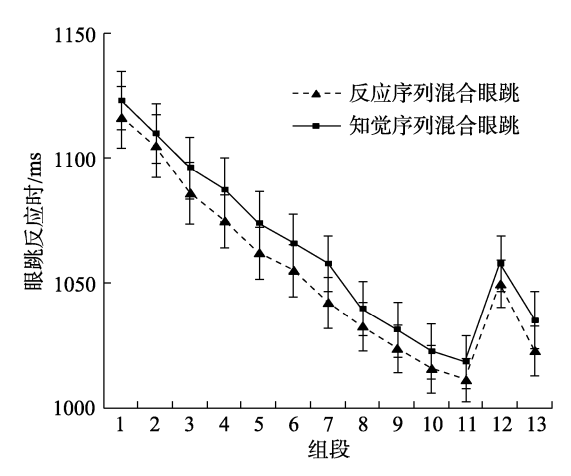


图 2 知觉序列和反应序列混合眼跳条件下的眼跳反应时

2.6.3 内隐序列学习量

内隐序列学习量计算方法为第 11 组段和第 13 组段眼跳反应时平均数与第 12 组段眼跳反应时的差值(Nissen & Bullemer, 1987)。为了考察知觉序列混合眼跳组和反应序列混合眼跳组是否发生了序列学习，分别将知觉序列混合眼跳组和反应序列混合眼跳组的序列学习成绩和 0 进行比较，进行单侧 t 检验。结果发现知觉序列混合眼跳组的序列学习成绩显著高于 0，知觉序列混合眼跳组发生序列学习(M = 30.93 ms, SD = 4.97), $t(14) = 24.07$, 差值 95% CI = [28.18, 33.69], $p < 0.001$, Cohen's d = 6.21。反应序列混合眼跳组的序列学习成绩显著高于 0，反应序列混合眼跳组发生序列学习(M = 32.60 ms, SD = 4.89), $t(14) = 24.07$, 差值 95% CI = [29.89, 35.31], $p < 0.001$, Cohen's d = 6.66。知觉序列混合眼跳组和反应序列混合眼跳组的内隐序列学习量差异不显著, $F(1, 28) = 0.86$, $p = 0.36$。

2.7 讨论

通过设定不同的目标刺激颜色，完成朝向眼跳或反向眼跳任务，实现了知觉序列和反应序列的分离。知觉序列混合眼跳条件下刺激位置遵循序列规则，反应序列混合眼跳条件下反应位置遵循序列规则。结果发现：在只存在知觉序列混合眼跳条件下发生了序列学习。随着组段的增加，眼跳反应时逐渐减小；插入随机组段后，眼跳反应时增加；组段恢复规则后，眼跳反应时减小。只存在反应序列混合眼跳条件下得到相似结果，并且知觉序列混合眼跳条件下的序列学习量和反应序列混合眼跳条件下的没有显著差异。结果说明序列学习存在知觉表征和反应表征。

实验 1 验证了内隐序列学习的知觉表征和反应表征，内隐序列学习是否存在知觉−反应联结表征呢？为了验证是否存在知觉−反应联结表征，开展实验 2 和实验 3 两个实验。实验 2 在朝向眼跳或反向眼跳条件下完成序列反应时任务，比较朝向眼跳/反向眼跳下的序列学习和混合眼跳条件下的是否存在差异。

3 实验 2：朝向眼跳和反向眼跳条件下的序列学习

3.1 被试

大学生 38 人，其中男性 9 名，女性 29 名，平均年龄为 19.89 ± 1.56 岁。视力或矫正视力正常，身体健康，均为右利手且母语为中文，之前均未参加过类似内隐学习实验。被试在完成实验后得到一份小礼物。

3.2 实验设计

采用单因素被试间实验设计，自变量为眼跳方式，有两个水平：朝向眼跳和反向眼跳。因变量为眼跳反应时。朝向眼跳要求被试眼睛跳向目标刺激所在位置；反向眼跳要求被试眼睛跳向目标刺激所在位置的镜像位置。被试随机分配到朝向眼跳组或反向眼跳组。

3.3 实验材料

在屏幕中央从左至右水平排列 4 个黑色方框，背景为白色，红色圆点出现在其中一个方框。在随机组段中，红色圆点随机出现在其中一个方框中；在序列组段中，红色圆点按照序列规则出现在其中一个方框中。

3.4 实验仪器

同实验 1。

3.5 实验程序

实验包括序列反应时任务和意识性水平测试两部分。

3.5.1 序列反应时任务

同实验 1，区别在于朝向眼跳或反向眼跳任务单独进行。朝向眼跳条件下，当红色圆点出现时，要求被试眼睛注视红色圆点所在位置，电脑自动翻屏；在反向眼跳条件下，当红色圆点出现时，要求被试眼睛注视红色圆点所在位置的镜像位置，电脑自动翻屏。

3.5.3　意识性水平测试

同实验 1。

3.6　结果与分析

采用眼动数据分析软件“Data Viewer 1.1”和 SPSS 21.0 进行数据分析。1 名被试由于眼睛校准存在问题, 1 名被试未能完成全部实验, 数据被剔除。删除 3 个标准差以外的极端数据(0.26%)。

3.6.1　意识性水平测试

同实验 1。6 名外显被试被剔除, 内隐被试共 30 人, 朝向眼跳组和反向眼跳组各 15 人。

3.6.2　眼跳反应时

朝向眼跳和反向眼跳条件下的眼跳反应时如图 3 所示。对 1~11 组段眼跳反应时进行 2 (组别：朝向眼跳组、反向眼跳组) × 11 (组段：1~11)方差分析, 结果发现：组别主效应显著, $F(1, 28) = 47.49$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.63$。朝向眼跳组的眼跳反应时(M = 528.29 ms, SD = 84.07)显著低于反向眼跳组的(M = 822.84 ms, SD = 142.60), 差值 95% CI = [206.99, 382.10]。组段主效应显著, $F(10, 280) = 53.75$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.66$, 随着组段增加, 眼跳反应时显著减小。组段和组别交互作用不显著, $F(10, 280) = 0.78$, $p = 0.65$。

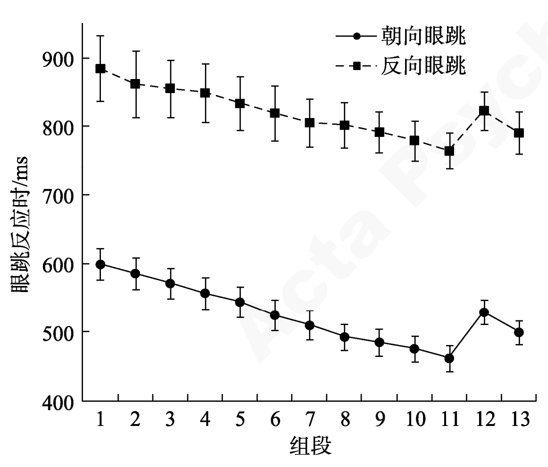


图 3　朝向眼跳和反向眼跳条件下的眼跳反应时

3.6.3　内隐序列学习量

内隐序列学习量计算方法同实验 1。为了考察朝向眼跳组和反向眼跳组是否发生序列学习, 分别将朝向眼跳组和反向眼跳组的序列学习成绩和 0 进行比较, 进行单侧 t 检验。结果发现朝向眼跳组的序列学习成绩显著高于 0, 朝向眼跳组发生了序列学习(M = 48.02 ms, SD = 6.00), $t(14) = 30.98$, 差值 95% CI = [44.69, 51.34], $p < 0.001$, Cohen’s d = 8.00。反向眼跳组的序列学习成绩显著高于 0, 反向眼跳组发生了序列学习(M = 45.54 ms, SD = 3.80), $t(14) = 46.38$, 差值 95% CI = [43.44, 47.65], $p < 0.001$, Cohen’s d = 11.98。朝向眼跳组的内隐序列学习量和反向眼跳组的内隐序列学习量差异不显著, $F(1, 28) = 1.82$, $p = 0.19$。

3.7　讨论

实验 2 在朝向眼跳和反向眼跳条件下完成序列反应时任务。结果发现朝向眼跳条件下发生序列学习。随着组段的增加, 眼跳反应时逐渐减小; 插入随机组段后, 眼跳反应时增加; 组段恢复规则后, 眼跳反应时减小, 和以往研究结果相一致(Kinder et al., 2008; Lu et al, 2018; Lu & Li, 2018)。反向眼跳条件下结果和朝向眼跳结果相似, 也发生了序列学习, 并且朝向眼跳和反向眼跳条件下的序列学习量没有显著差异。由于反向眼跳条件下刺激和反应位置是镜像关系, 眼动反应包含了反应抑制过程, 而朝向眼跳条件下刺激和反应位置是同一个位置, 反向眼跳条件下的眼跳反应时长于朝向眼跳条件下的。由于采用眼动作为反应, 控制了反应效果因素, 反应效果观点无法解释本研究结果(Hoffmann et al., 2003)。被试可能对知觉序列、反应序列或知觉–反应联结序列发生了学习。为了将知觉–反应联结表征和知觉表征、反应表征相分离, 实验 3 增加了分心刺激, 分心刺激和目标刺激享有一个共同特征, 即分心刺激和目标刺激具有相同颜色或相同形状。由于知觉–反应联结规则的核心机制是反应选择(Schumacher & Schwarb, 2009), 分心刺激对知觉表征、反应表征产生干扰, 对知觉–反应联结表征没有影响。比较有、无分心刺激反向眼跳条件下的是否发生序列学习, 两者的序列学习量是否存在差异。

4　实验 3：有、无分心刺激反向眼跳条件下的序列学习

4.1　被试

大学生 38 人, 其中男性 11 名, 女性 27 名, 平均年龄为 19.92 ± 1.65 岁。视力或矫正视力正常, 身体健康, 均为右利手且母语为中文, 之前均未参加过类似内隐学习实验。被试在完成实验后得到一份小礼物。

4.2　实验设计

采用单因素被试间实验设计, 自变量为分心刺激, 有两个水平：有分心反向眼跳和无分心反向眼跳, 因变量为眼跳反应时。被试随机分配到有分心反向眼跳组或无分心反向眼跳组。

4.3 实验材料

同实验 2，区别在于有分心刺激条件下，增加了分心刺激：绿色圆点和红色正方形。分心刺激和目标刺激共享了一个特征，绿色圆点和红色圆点具有相同形状；红色正方形和红色圆点具有相同颜色。

4.4 实验仪器

与实验 1 相同。

4.5 实验程序

和实验 2 相同，区别在于增加了分心刺激。

4.6 结果与分析

采用眼动数据分析软件“Data Viewer 1.1”和SPSS 21.0 进行数据分析。删除 3 个标准差以外的极端数据(0.26%)。

4.6.1 意识性水平测试

同实验 1。8 名外显被试数据被剔除，有分心反向眼跳组和无分心反向眼跳组各 15 人。

4.6.2 眼跳反应时

有分心反向眼跳和无分心反向眼跳条件下的眼跳反应时如图 4 所示。对 1~11 组段眼跳反应时进行 2 (组别：有分心反向眼跳、无分心反向眼跳) × 11 (组段：1~11)方差分析，结果发现：组别主效应显著，$F(1, 28) = 17.39$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.38$，无分心反向眼跳组的眼跳反应时(M = 822.84 ms, SD = 37.67)显著低于有分心反向眼跳组的(M = 1175.70 ms, SD = 47.75)，差值 95% CI = [179.54, 526.17]。组段主效应显著，$F(10, 280) = 51.81$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.65$，随着组段增加，眼跳反应时显著减小。组段和组别交互作用不显著，$F(10, 280) = 0.85$, $p = 0.58$。

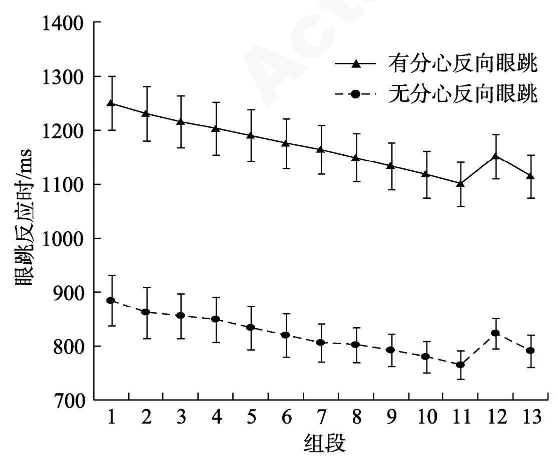


图 4 有分心反向眼跳和无分心反向眼跳条件下的眼跳反应时

4.6.3 内隐序列学习量

内隐序列学习量的计算方法同实验 1。为了考察有分心反向眼跳和无分心反向眼跳是否发生序列学习，分别将有分心反向眼跳和无分心反向眼跳条件下的序列学习成绩和 0 进行比较，进行单侧 t 检验。结果发现无分心反向眼跳组的序列学习成绩显著高于 0，无分心反向眼跳组发生了序列学习(M = 45.54 ms, SD = 3.80), $t(14) = 46.38$，差值 95% CI = [43.44, 47.65], $p < 0.001$, Cohen’s d = 11.98。有分心反向眼跳组的序列学习成绩显著高于 0，有分心反向眼跳组发生了序列学习(M = 44.50 ms, SD = 4.64), $t(14) = 37.17$，差值 95% CI = [41.94, 47.07], $p < 0.001$, Cohen’s d = 9.59。无分心反向眼跳组和有分心反向眼跳组的内隐序列学习量差异不显著，$F(1, 28) = 0.45$, $p = 0.51$。

4.7 讨论

实验 3 在有分心反向眼跳和无分心反眼跳条件下完成序列反应时任务。结果发现有分心反向眼跳条件下发生了序列学习。随着组段的增加，眼跳反应时逐渐减小；插入随机组段后，眼跳反应时增加；组段恢复规则后，眼跳反应时减小。和无分心反向眼跳条件下结果相似。但无分心反向眼跳条件下的眼跳反应时显著低于有分心反向眼跳条件下的，表明增加的分心刺激干扰了知觉序列和反应序列加工。但有、无分心刺激反向眼跳条件下的序列学习量没有显著差异，说明序列学习存在知觉−反应联结表征。

5 综合讨论

本研究通过 3 个眼动实验考察了内隐序列学习的表征方式，结果发现：(1)朝向眼跳和反向眼跳条件下都发生了内隐序列学习，序列学习量差异不显著；(2)有分心反向眼跳和无分心反向眼跳条件下都发生了内隐序列学习，序列学习量差异不显著；(3)知觉序列混合眼跳和反应序列混合眼跳条件下都发生了内隐序列学习，序列学习量差异不显著。下面从序列学习表征理论和眼动记录法两方面展开讨论。

5.1 序列学习的表征方式

序列学习的眼动范式中，被试不需要做出按键反应，反应−效果联结学习观点无法解释本研究结果。按照反应−效果联结学习观点(Hoffmann et al., 2003)，按键过程中，被试体验到按键动作的反馈，例如按照键盘时，手指上感受到的压力，按键时还会感受到动觉信息的反馈。这些反应效果，构成了反应−效果联结，序列学习就是对反应−效果联结

序列的学习。当不需要做出按键反应时，不存在反应–效果联结序列，但序列学习仍旧发生，研究结果不支持反应–效果联结学习观点。

序列学习的单一表征形式观点只能部分解释实验结果。在朝向眼跳和反向眼跳条件下，无论是否存在分心刺激，发生序列学习，符合知觉–反应联结学习观点或反应学习观点；在知觉序列混合眼跳条件下，发生序列学习，符合知觉学习观点；在反应序列混合眼跳下，发生序列学习，符合反应学习观点；朝向眼跳和反向眼跳条件下的序列学习量显著高于知觉序列混合眼跳、反应序列混合眼跳条件下的，序列学习单一表征形式观点，如知觉学习观点、反应学习观点或知觉–反应联结学习观点无法进行解释。

有学者对序列学习这种一分为二的单一表征形式观点提出了批判，Goschke (1998)提出了多重独立序列平行学习理论(Parallel learning of multiple independent sequences) (Goschke & Bolte, 2012)，认为序列学习建立在相关信息基础上，这些相关信息可以同时发生于不同加工系统，可以对几个不相关序列同时发生学习。需要指出的是，有学者认为相关序列可以发生学习，将相关序列整合为一个序列进行学习(Röttger et al., 2019)。Cleeremans 和 Jiménez (2002)表达了 Goschke (1998)类似观点。认为在内隐学习中表征是动态的和渐进的，内隐学习获得的知识可以被看作是在样例表征和抽象表征连续体的某一点上；而且表征的质量决定了内隐学习获得知识是否进入意识，意识也是动态的和渐进的(杨海波　等, 2019)，形成高质量的表征需要时间。

Goschke (1998)从序列学习的知觉学习和反应学习维度, Cleeremans 和 Jiménez (2002)从序列学习的样例学习和抽象学习维度分别表述了序列学习多重表征观点。研究发现确实同时存在知觉表征和反应表征或同时存在具体知识表征和抽象规则表征(戴惠　等, 2018; 姜珊　等, 2014; Fu et al., 2018)。这两大理论观点并不是截然对立的，是相辅相成、相互促进的，是具有内在联系的统一体。本研究将两种理论进行整合，首次提出了序列学习的三元表征模型，图 5 所示。

内隐序列学习存在知觉表征、反应表征和规则表征，知觉表征、反应表征和抽象规则表征并不是截然对立的，是相辅相成、相互促进的，是具有内在联系的统一体。具体知识表征和抽象规则表征是上下层关系，首先发生具体知识表征，随着学习的

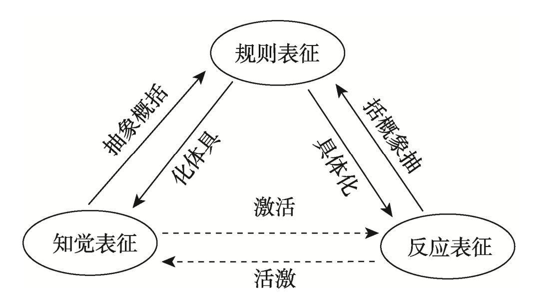


图 5　序列学习三元表征模型

进展，抽象性逐渐增强，从具体知识表征上升到抽象规则表征。具体知识表征包括知觉表征和反应表征，两者是并列关系。如果知觉和反应存在匹配关系，可形成知觉–反应联结；如果知觉和反应不存在匹配关系，无法形成知觉–反应联结。三元表征模型可以很好地解释本实验结果。未来研究还需要通过序列学习迁移等范式进一步验证和完善三元表征模型(姜珊　等, 2014; 戴惠　等, 2018; Fu et al., 2018; Schumacher et al., 2018)。

5.2　序列学习眼动记录法

在序列学习表征方式研究中，传统的按键反应存在 2 点不足。其一，按键反应是个复杂的认知加工过程。通过按键进行反应，包含了手指位置序列学习、手指动作序列学习、触压感序列学习和眼动序列学习等过程。传统的按键反应，无法将这几种类型的学习分离开来。由于结果中可能包含了几种不同表征方式，并且很难从根本上进行区分，是序列学习的表征方式研究遇到的难题。其二，按键反应时基线存在较大个体差异性，特别是不同年龄段的被试，儿童、成人和老年人的反应时基线差异很大。针对上述两点不足，眼动记录法可以很好地解决。第一，因为眼动作为序列反应时任务的反应方式，序列反应时任务中刺激位置和眼跳位置绝大多数是同一个位置(反眼跳除外)，不需要学习刺激–反应之间的匹配关系。而且仅包含了眼动序列学习，不存在其他类型的序列学习。可以看出眼动反应是简单的反应形式，可以较好地解决按键反应过于复杂这个问题。第二，由于眼动受年龄和疾病的影响较小，眼动在 1 岁前就已经发育成熟(闫国利，白学军，2018)，眼动的反应基线差异很小，可以很好地解决按键反应时基线差异大这个问题。

本研究发现在朝向眼跳条件下，只观察序列会发生序列学习，和以往研究结果相一致(Kavakci & Dollaghan, 2019; Koch et al., 2020; Tal et al., 2021; Tanaka & Watanabe, 2018)。并且本研究首次发现反向眼跳条件下，无论是否存在分心刺激，观察序列

都会发生序列学习。和朝向眼跳下是否存在分心刺激，观察序列都会发生序列学习的结果相一致(卢张龙 等, 2011)。另外本研究首次发现朝向眼跳和反向眼跳混合条件下，当仅存在知觉序列或反应序列时，观察序列仍旧发生序列学习。通过操纵目标刺激颜色，确定进行朝向眼跳任务还是反向眼跳任务，从而可以实现对知觉序列或反应序列的操纵。吕勇等人(2008)为了获得更纯净的动觉偏差效果，知觉序列保持不变，在学习阶段通过指导语告知被试换手进行反应。通过指导语改变反应的方法相对复杂，并且只有知觉序列保持不变。本研究使用的朝向眼跳和反向眼跳混合眼跳任务相对简单，在自然状态下完成不同任务转换，而且能够实现知觉序列或反应序列保持不变，体现出眼动记录法在序列学习表征方式研究中的优势。未来序列学习表征机制研究，可以将眼动记录法更广泛应用于儿童、病人等群体中(Koch et al., 2020)，并进一步挖掘眼动数据(Kavakci & Dollaghan, 2019; Tal & Vakil, 2020)，更全面、更深入地考察内隐序列学习表征机制的发展特征。

6 结论

内隐序列学习的表征依赖于序列信息：当内隐序列学习存在知觉序列时发生知觉表征；当内隐序列学习存在反应序列时发生反应表征；当内隐序列学习存在知觉−反应联结序列时发生知觉−反应联结表征。

参 考 文 献

Cleeremans, A., Allakhverdov, V., & Kuvaldina, M. (2019). *Implicit learning: 50 years on*. Hove: Routledge.

Cleeremans, A., & Jiménez, L. (2002). Implicit learning and consciousness: A graded, dynamic perspective. In R. M. French & A. Cleeremans (Eds.), *Implicit learning and Consciousness: An empirical, philosophical and computational consensus in the making* (pp. 1–40). Psychology Press: Sussex BN3 2FA.

Coomans, D., Deroost, N., Vandenbossche, J., van den Bussche, E., & Soetens, E. (2012). Visuospatial perceptual sequence learning and eye movements. *Experimental Psychology*, *59* (5), 279–285.

Dai, H., Zhu, C. L., & Liu, D. Z. (2018). Is implicit knowledge abstract? Evidence from implicit sequence learning transfer. *Acta Psychologica Sinica*, *50*(9), 965–974.

[戴惠, 朱传林, 刘电芝. (2018). 内隐知识具有抽象性吗? 来自内隐序列学习迁移的证据. *心理学报*, *50*(9), 965–974.]

Deroost, N., & Coomans, D. (2018). Is sequence awareness mandatory for perceptual sequence learning: An assessment using a pure perceptual sequence learning design. *Acta Psychologica*, *183*, 58–65.

Deroost, N., Vandenbossche, J., Zeischka, P., Coomans, D., & Soetens, E. (2012). Cognitive control: A role for implicit learning? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *38*(5), 1243–1258.

Fu, Q, F., Sun, H, M., Dienes, Z., & Fu, X, L. (2018). Implicit sequence learning of chunking and abstract structures. *Consciousness and Cognition*, *62*, 42–56.

Goschke, T. (1998). Implicit learning of perceptual and motor sequences: Evidence for independent learning systems. In M. A. Stadler & P. A. Frensch (Eds.), *Handbook of implicit learning* (pp. 401–444). Thousand Oaks, CA: Sage Publications Inc.

Goschke, T., & Bolte, A. (2012). On the modularity of implicit sequence learning: Independent acquisition of spatial, symbolic, and manual sequences. *Cognitive Psychology*, *65*, 284–320.

Guan, S. Y., & Guo, X. Y. (2016). Knowledge acquistion and the conscious state of knowledge in implicit learning, *Studies of Psychology and Behavior*, *14*(2), 191–201.

[关守义, 郭秀艳. (2016). 内隐学习中的知识习得及其无意识性测量. *心理与行为研究*, *14*(2), 191–201.]

Guo, X. Y. (2003). *Implicit learning*. Shanghai, China: East China Normal University Press.

[郭秀艳. (2003). *内隐学习*. 上海: 华东师范大学出版社.]

Guo, X. Y., Jiang, S., & Gong, R. (2008). Event-related potential studies in sequence learning. *Journal of Psychological Science*, *31*(2), 404–407.

[郭秀艳, 姜珊, 龚嵘. (2008). 序列学习的 ERP 研究综述. *心理科学*, *31*(2), 404–407.]

Haider, H., Eberhardt, K., Esser, S. & Rose, M. (2014). Implicit visual learning: How the task set modulates learning by determining the stimulus-response binding. *Consciousness and Cognition*, *26*, 145–161.

Haider, H., Eberhardt, K., Kunde, A. & Rose, M. (2013). Implicit visual learning and the expression of learning. *Consciousness and Cognition*, *22*(1), 82–98.

Hoffmann, J., Martin, C., & Schilling, A. (2003). Unique transitions between stimulus and responses in SRT tasks: Evidence for the primacy of response predictions. *Psychological Research*, *67*(3), 160–173.

Howard, J. H., Jr., Howard, D. V, Dennis, N, A. & Kelly, A. J. (2008). Implicit learning of predictive relationships in three-element visual sequences by young and old adults. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *34*, 1139–1157.

Jablonowski, J., Taesler, P., Fu, Q., & Rose, M. (2018). Implicit acoustic sequence learning recruits the hippocampus. *Plos One*, *13*, e0209590.

Jacoby, L. L. (1991). A process dissociation framework: Separating automatic from intentional uses of memory. *Journal of Memory and Language*, *30*, 513–541.

Jiang, S., Guo, X. Y., Yang, J., & Ma, W. D. (2014). Implicit learning and transfer effect of tonal nonadjacent rule, *Psychological Exploration*, *34*(5), 416–422.

[姜珊, 郭秀艳, 杨靖, 马闻笛. (2014). 汉语声调远距离规则的内隐学习及其迁移效应, *心理学探新*, *34*(5), 416–422.]

Kavakci, M., & Dollaghan, C. (2019). A new method for studying statistical learning in young children. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, *62*(7), 2483–2490.

Kinder, A., Rolfs, M., & Kliegl, R. (2008). Sequence learning at optimal stimulus-response mapping: Evidence from a serial reaction time task. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *61*(2), 203–209.

Koch, F. S., Sundqvist, A., Thornberg, U. B., Nyberg, S., Lum, J. A. G., Ullman, M. T., … Heimann, M. (2020). Procedural memory in infancy: Evidence from implicit sequence learning in an eye-tracking paradigm. *Journal of Experimental Child Psychology*, *191*, 104733.

Lu, Z. L. (2021). The application of eye-movement technique in the study of sequence learning. *Psychological Research*, *14*(6), 512–517.

[卢张龙. (2021). 眼动记录法在序列学习研究中的应用. *心理研究, 14*(6), 512–517.]

Lu, Z. L., Huang, L. J. Q., & Li, X. Y. (2018). An experimental study on relationship between subliminal emotion and implicit sequence learning: Evidence from eye movements. *International Journal of Psychological and Brain Sciences*, *3*(1), 1–6.

Lu, Z. L., & Li, X. Y. (2018). An eye movement study on the relationship between multiple implicit sequence learning and attention. *Psychology and Behavioral Sciences*, *7*(1), 8–13.

Lu, Z. L., Lv, Y., & Bai, X. J. (2011). Attention load has no effect on implicit sequence learning: An eye movement study. *Studies of Psychology and Behavior*, *9*(3), 214–218.

[卢张龙, 吕勇, 白学军. (2011). 内隐序列学习不受注意负荷的影响:来自眼动的证据, *心理与行为研究*, *9*(3), 214–218.]

Lv, Y., Hu, W., Wu, G. L., & Shen, D. L. (2008). An experimental study on implicit and explicit learning representations in a serial reaction time task. *Journal of Psychological Science, 31*(4), 770–773.

[吕勇, 胡伟, 吴国来, 沈德立. (2008). 序列反应时任务中内隐和外显学习表征方式的实验研究. *心理科学*, *31*, 770–773.]

Marcus, D. J., Karatekin, C., & Markiewicz, S. (2006). Oculomotor evidence of sequence learning on the serial reaction time task. *Memory & Cognition, 34*, 420–432.

Németh, D., Hallgató, E., Janacsek, K., Sándor, T., & Londe, Z. (2009). Perceptual and motor factors of implicit skill learning. *Neuroreport*, *20*, 1654–1658.

Nissen, M. J., & Bullemer, P. (1987). Attentional requirements of learning: Evidence from performance measures. *Cognitive Psychology*, *19*(1), 1–32.

Röttger, E., Haider, H., Zhao, F., & Gaschler, R. (2019). Implicit sequence learning despite multitasking: The role of across-task predictability. *Psychological Research, 83*, 526–543.

Schumacher, E. H., Cookson, S. L., Smith, D. M., Nguyen, T. V. N., Sultan, Z., Reuben, K. E., & Hazeltine, E. (2018). Dual-task processing with identical stimulus and response sets: Assessing the importance of task representation in dual-task interference. *Frontiers in Psychology, 9*, 1031.

Schumacher, E., H., & Schwarb, H. (2009). Parallel response selection disrupts sequence learning under dual task conditions. *Journal of Experimental Psychology: General*, *138*, 270–290.

Schwarb, H., & Schumacher, E. H. (2010). Implicit sequence learning is represented by stimulus-response rules. *Memory & Cognition*, *38*, 677–688.

Taesler, P., Jablonowski, J., Fu, Q. F., & Rose, M. (2019). Modeling implicit learning in a cross-modal audio-visual serial reaction time task. *Cognitive Systems Research, 54*, 154–164.

Tal, A., Bloch, A., Cohen-Dallal, H., Aviv, O., Ashkenazi, S. S., Bar, M., & Vakil, E. (2021). Oculomotor anticipation reveals a multitude of learning processes underlying the serial reaction time task. *Scientific Reports*, *11*, 6190.

Tal, A., & Vakil, E. (2020). How sequence learning unfolds: Insights from anticipatory eye movements. *Cognition*, *201*(6), 104291.

Tanaka, K., & Watanabe, K. (2018). Effects of model types in observational learning on implicit sequential learning. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *71*(7), 1596–1606.

Vakil, E., Bloch, A., & Cohen, H. (2017). Anticipation measures of sequence learning: Manual versus oculomotor versions of the serial reaction time task. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *70*(3), 579–589.

Yan, G. L., & Bai, X. J. (2018). *The foundation and application of eye movement technology*. Beijing: Beijing Normal University Press.

[闫国利, 白学军. (2018). *眼动分析技术的基础与应用*. 北京: 北京师范大学出版社.]

Yang, H. B., Guo, C., & Liu, D. Z. (2019). Graded consciousness in implicit sequence learning: Evidences form the development and forgetting characteristics of acquired knowledge. *Journal of Psychological Science*, *42*(2), 287–292.

[杨海波, 郭成, 刘电芝. (2019). 内隐序列学习中的渐进意识: 来自习得知识的发展与遗忘的证据. *心理科学*, *42*(2), 287–292.]

Zhang, J. X., Tang, D., Li, Y. L., & Liu, D. Z. (2016). Anti-opposition logic paradigm: An improvement on the opposition logic in implicit artificial grammar learning. *Acta Psychologicia Sinica*, *48*(9), 1130–1142.

[张剑心, 汤旦, 李莹丽, 刘电芝. (2016). 反向对抗逻辑范式的创立与证实——人工语法 PDP 对抗逻辑的改进. *心理学报*, *48*(9), 1130–1142.]

Exploring the representational mechanism of implicit sequence learning: Evidence from eye movements

LU Zhanglong, LIU Mengna, LIU Yujie, MA Panpan, ZHANG Ruiping

(*School of Education, Zhengzhou University, Zhengzhou* 450001, *China*)

Abstract

The representational mechanism of implicit sequence learning is one of the basic problems in the field of implicit learning, and it remains unclear. Three key theories have been proposed to demonstrate the representational mechanism of implicit sequence learning: stimulus-stimulus association learning (S-S), response-response association learning (R-R), and stimulus-response association learning (S-R). Most studies of implicit sequence learning employed reaction time as a dependent variable to investigate the representational mechanism. However, using reaction time directly in the model may not be ideal as the measured reaction time has several limitations that may confuse the results. For example, the baseline of reaction time may vary across different age groups. In order to overcome the shortcomings of reaction time, the present research applied an eye movement tracking technique and used the saccadic response time as the dependent variable.

In the current study, prosaccade and antisaccade trials in single or mixed tasks were investigated with eye movements, which were recorded using an EyeLink 1000 plus eye-tracker (SR Research inc., Canada). In a prosaccade trial, the subject was asked to look towards a newly appearing target, while in an antisaccade trial, a saccade of the subject to the location opposite to the appeared target was required. Three sets of experiments were conducted. In Experiment 1, forty (40) college students completed the mixed tasks which included both the prosaccade tasks (red target) and the antisaccade tasks (green target). The participants were randomly assigned to a stimulus sequence group (i.e. stimulus followed the sequence) or a response sequence group (i.e. response followed the sequence). In Experiment 2, thirty-eight (38) college students completed either the prosaccade tasks or antisaccade tasks by the instruction of experiment 2. In Experiment 3, two distractors which had one of the same features as the target (color/shape) were added in the trial.Thirty-eight (38) college students completed the distractor task or the no distractor task.

The results showed that: (1) In the mixed saccadic tasks, there was implicit sequence learning in the stimulus sequence condition and in the response sequence condition; (2) in the single saccadic tasks, there was implicit sequence learning in the prosaccade condition and in the antisaccade condition. However, significant difference in the sequence learning scores between the mixed saccadic tasks and the single saccadic tasks was observed; (3) in the distractor tasks, there was implicit sequence learning in the distractor task condition and in the no distractor task condition.

The results of the current three experiments indicate that the representational mechanism of implicit sequence learning includes learning of multiple sequences: stimulus-stimulus associations learning (S-S); response-response associations learning (R-R); and stimulus-response associations learning (S-R).

Key words sequence learning, representation, antisaccade, mixed saccade, eye movements